

**Barbara LUŇÁČKOVÁ<sup>1</sup>, Eva HRUBEŠOVÁ<sup>2</sup>**

**VLIV DYNAMICKÝCH PARAMETRŮ BERANĚNÉ PILOTY NA SEIZMICKOU ODEZVU  
ZÁKLADOVÉ KONSTRUKCE**

**Abstrakt**

Jedním z nežádoucích efektů souvisejícím s beraněním pilot je šíření vibrací prostředím, které mohou nepříznivě ovlivnit sousedící zástavbu. Míra nežádoucích účinků je dána mnoha faktory. Z těch hlavních vyjmenujme alespoň velikost dynamických parametrů beranidla, vzdálenost beraněné piloty od zástavby, konstrukční a materiálové parametry samotné piloty a zástavby a charakter základové půdy. V článku autoři poukázali na možnost využití výpočtového programu CESAR-CLEO-LCPC 3D (MKP) ke stanovení vlivu změny dynamických parametrů (konkrétně frekvence beranidla a amplitudy beranidla) na seizmickou odezvu plošné základové konstrukce.

**1 ÚVOD**

Piloty jsou jedny z nejrozšířenějších prvků hlubinných základů staveb. Slouží k přenesení zatížení z konstrukce do únosných vrstev podloží. Mají zpravidla tvar sloupů, přičemž příčný průřez může být kruhový nebo jakkoliv hranatý a členitý, může být po délce konstantní nebo proměnný. Z hlediska zhotovení se piloty rozdělují do dvou základních skupin – piloty předem vyrobené a zahloubené na daném místě a na piloty zhotovované in situ. Předem vyrobené piloty mohou být dřevěné, ocelové nebo železobetonové. Při zatlačování prefabrikovaných pilot do masivu se často používá tzv. beranidel, které jsou opřeny nebo pevně uchyceny na koncovou část piloty. Beranidla můžeme rozdělit do tří základních typů, a to na tzv. beranidla úderová, beranidla vibrační, ta jsou předmětem zájmu naší studie, a beranidla kombinovaná, která využívají rázového i vibračního účinku. Jedním z nežádoucích efektů, které souvisí s beraněním pilot, je šíření vibrací do okolí, které mohou nepříznivě ovlivnit sousedící zástavbu. Míra nežádoucích účinků je dána mnoha faktory. Z těch hlavních vyjmenujme alespoň velikost dynamických parametrů (amplituda síly vibračního beranidla, frekvence beranidla), vzdálenost beraněné piloty od zástavby, konstrukční a materiálové parametry samotné piloty a zástavby a charakter základové půdy. V tomto příspěvku jsou prezentovány výsledky modelových studií vlivu velikosti dynamických parametrů na velikost seizmické odezvy v základové konstrukci vystavené účinkům beranění železobetonové prefabrikované piloty, a to s pomocí výpočtového programu CESAR-LCPC-CLEO 3D.

**2 CHARAKTERISTIKA VÝPOČTOVÉHO PROGRAMU A MODELOVÉ STUDIE**

Problematika beranění prefabrikované piloty vibračním beranidlem byla modelována s pomocí výpočtového systému CESAR-LCPC CLEO 3D, který pracuje na principu metody konečných prvků. Program poskytuje výběr z šesti dynamických modulů pro řešení různých způsobů dynamického zatížení. Pro modelování této úlohy byl vybrán modul DYNI, který řeší odezvu dynamicky zatížené konstrukce prostřednictvím přímé integrace. Modul DYNI dává možnost průběžné (krokové) kontroly při řešení dynamické rovnice rovnováhy mající tvar:

---

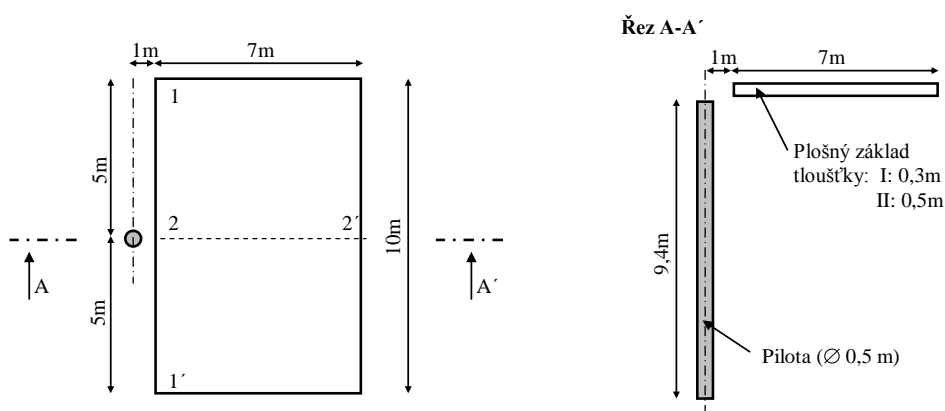
<sup>1</sup> Ing., VŠB – TU Ostrava, Fakulta stavební, L. Podestě 1875, Ostrava - Poruba, 708 33; barbara.lunackova@vsb.cz

<sup>2</sup> Doc. RNDr., PhD., VŠB – TU Ostrava, Fakulta stavební, L. Podestě 1875, Ostrava - Poruba, 708 33; eva.hrubesova@vsb.cz

[1]

$$\{F(t)\}$$

V autory vytvořené modelové situaci měla železobetonová pilota průměr 0,5m, délku 9,4m a byla beraněná ve vzdálenosti 1m od hrany plošného základu o půdorysných rozměrech 7x10x0,3m. Schéma modelu je znázorněno na obr. č. 1. Horninové prostředí bylo zvoleno jako homogenní, izotropní zeminové prostředí. Materiálové charakteristiky piloty, základové konstrukce a zeminového prostředí jsou uvedeny v tab. č. 1. Vliv vody v modelu nebyl uvažován.



**Obr. č. 1: Schéma modelu**

**Tab. č. 1: Materiálové parametry**

	$\rho$ [kgm <sup>-3</sup> ] Objemová hmotnost	E [MPa] Deformační modul	$\nu$ [-] Poissonovo číslo
<b>Zemina</b>	1620	80	0,483
<b>Pilota</b>	2500	2,6e4	0,2
<b>Základ</b>	2500	3,1e4	0,2

Cílem studie bylo stanovit, jak ovlivní změna dynamických parametrů beranidla charakter seismické odezvy základové konstrukce. Dynamické zatížení bylo modelováno jako plošné zatížení působící na hlavě piloty. Dynamickými parametry se v tomto případě rozumí velikost amplitudy beranidla a frekvence beranidla. Průběh periodicky proměnné síly, která vyvoluje ustálené kmitání a která má sinusový průběh, lze definovat vztahem:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot \sin(\pi \cdot f_0 \cdot t) \quad [2]$$

kde  $\sigma_0 = 20\text{MPa}$  maximální amplituda síly vyvozené beranidlem,  
 $f_0 = 23,8\text{Hz}$  frekvence beranidla.

Hodnoty maximální amplitudy a frekvence beranidla jsou převzaty z [Technical Instructions – Pile Driving Equipment, 1998] ,

Modelovaly se vždy dva vibrační cykly, které byly rozděleny do dílčích výpočtových kroků. Každý krok odpovídal časovému přírůstku 0,0005s a počet kroků se měnil v závislosti na hodnotě frekvence beranidla.

Navíc bylo snahou stanovit, zda na seizmickou odezvu základové konstrukce bude mít větší vliv změna frekvence či změna amplitudy beranidla.

V první fázi byla v parametrické studii modifikována amplituda (při konstantní frekvenci – soubor modelů IC), následně pak frekvence (při konstantní amplitudě – soubor modelů IIC) - viz tab. č. 2. Amplituda (resp. frekvence) byla postupně zvyšována z výchozích 20MPa (resp. 23,8Hz) o 10%, 20%, 30%, 40% a 50% a posléze snižována o 10%, 20% až 50.

**Tab. č. 2:** Hodnoty dynamických parametrů v dílčích modelech studie IC a IIC

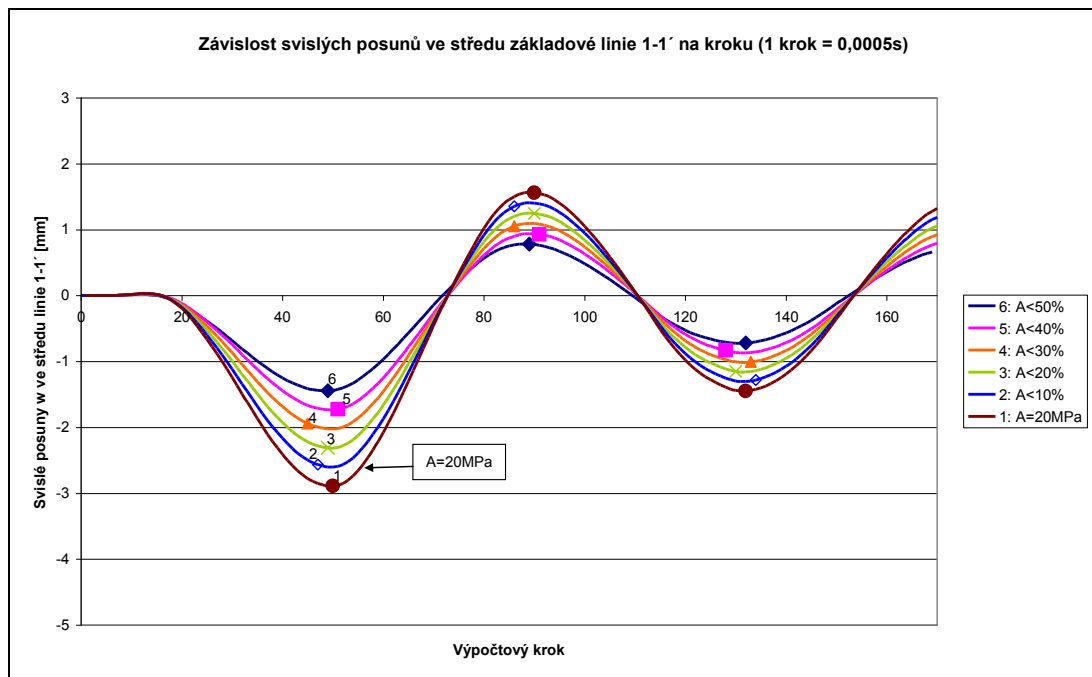
**Chyba! Objekty nemohou být vytvořeny úpravami kódů polí.**

### 3 VÝSLEDKY ŘEŠENÍ

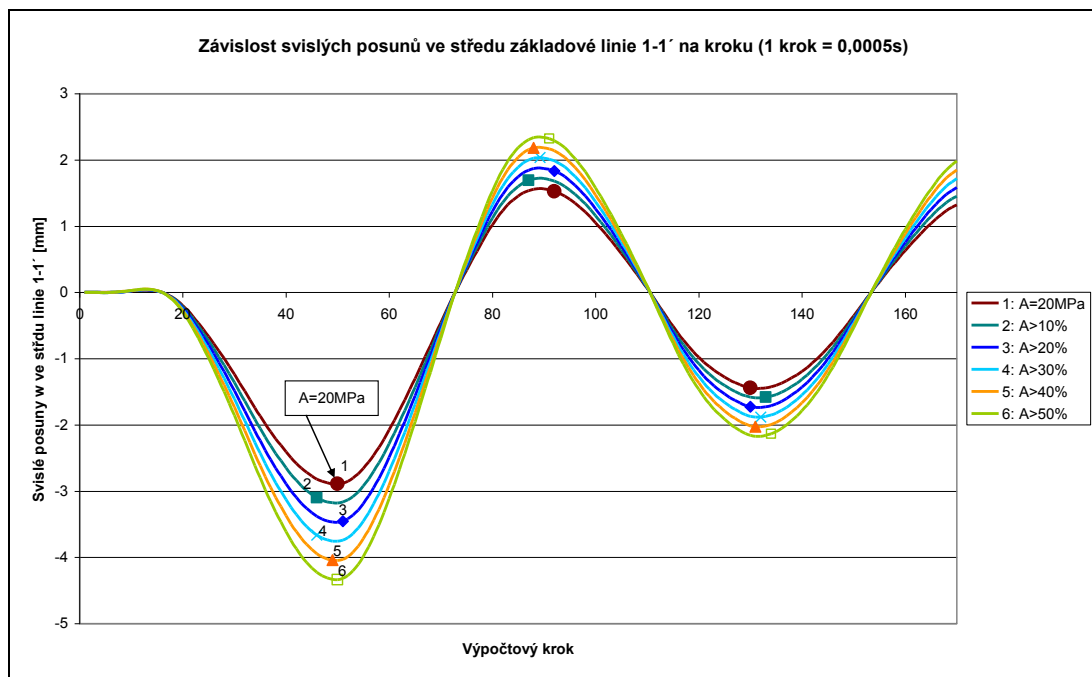
#### Dílčí výsledky řešení – modelová studie IC (proměnná amplituda)

Výsledky řešení dílčích modelových studií byly porovnávány dle velikosti svislých posunů v základové konstrukci. V grafech č. 1a, 1b je znázorněn vývoj posunů středu základové linie 1-1' (poloha tohoto bodu viz obr. č. 1) v závislosti na čase (resp. na výpočtovém kroku, kdy 1 krok odpovídal časovému přírůstku 0,0005s) pro modelovou studii označenou jako IC, tedy pro skupinu modelů s proměnou amplitudou a konstantní frekvencí. Je zde jasná tendence zvětšujících se posunů v posuzovaném bodě se zvětšující se amplitudou beranidla. Obdobně tomu bylo i u ostatních bodů základové konstrukce. Je také nutné poznamenat, že změna amplitudy beranidla neovlivnila časovou lokalizaci maxim / minim svislých posunů v základové konstrukci.

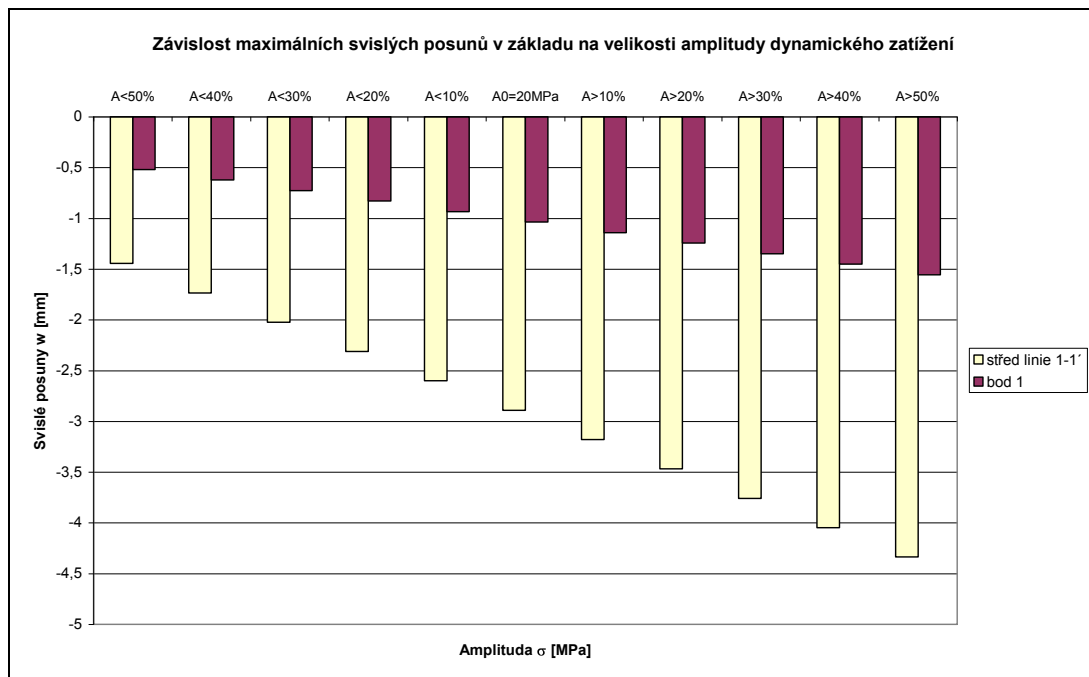
Ve sloupcovém grafu č. 2 je vykreslena velikost maximálních posunů dosažených ve středu linie 1-1' (bod 2) a v bodě 1 (totéž v bodě 1') v závislosti na hodnotě amplitudy. Z grafu je patrné jak s rostoucí hodnotou amplitudy rostou i sledované svislé posuny v plošné základové konstrukci.



**Graf. č. 1a:** Závislost svislých posunů ve středu základové linie 1-1' na výpočtovém kroku (studie IC – proměnná amplituda) – část 1 (snižování výchozí hodnoty amplitudy  $A \equiv \sigma$ )



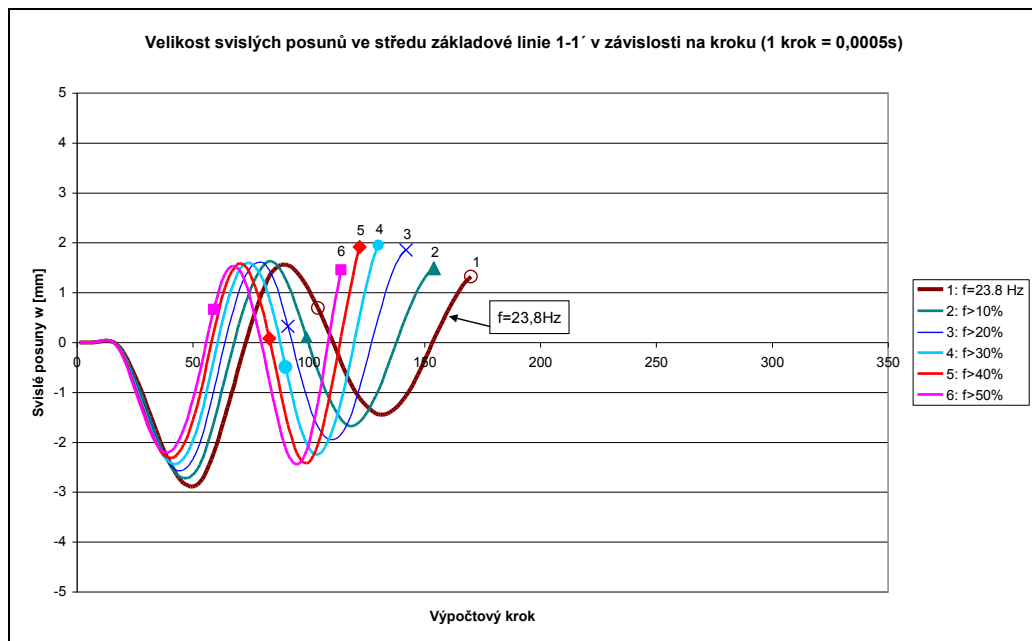
**Graf. č. 1b:** Závislost svislých posunů ve středu základové linie 1-1' na výpočtovém kroku (studie IC – proměnná amplituda) – část 2 (zvyšování výchozí hodnoty amplitudy  $A \equiv \sigma$ )



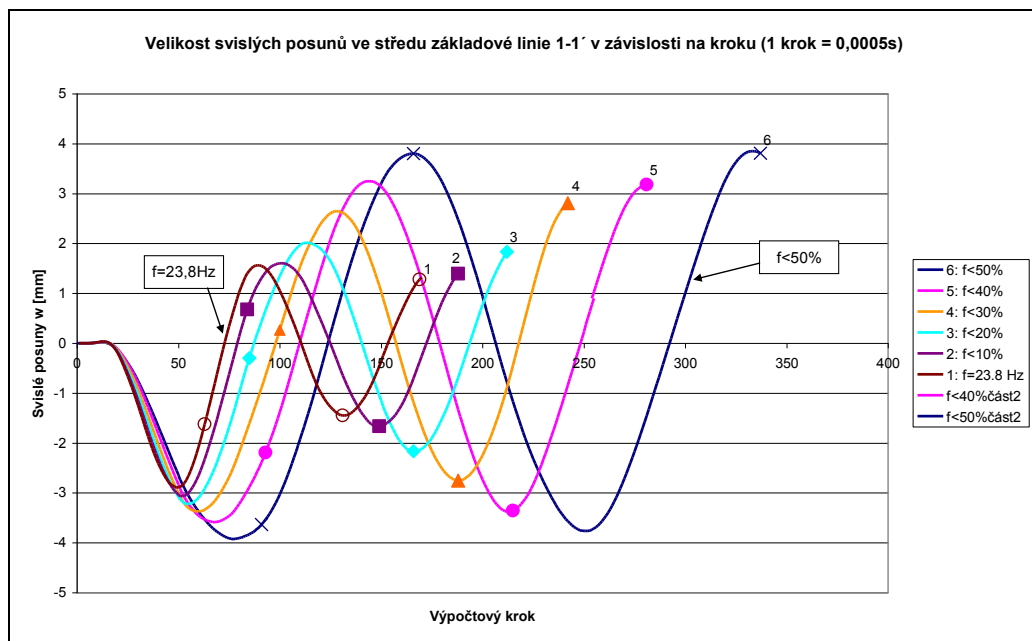
**Graf. č. 2:** Závislost maximálních svislých posunů v základu dosažených v průběhu dvou modelovaných vibračních cyklů na velikosti amplitudy beranidla (studie IC – proměnná amplituda)

#### Dílčí výsledky řešení – modelová studie IIC (proměnná frekvence)

V další části modelové studie se sledovaly posuny v základové spáře konstrukce v závislosti na měnící se frekvenci beranidla při konstantní amplitudě. Výsledky studie jsou vykresleny v grafech č. 3a, 3b, kde je znázorněn vývoj svislých posunů v průběhu dvou modelovaných vibračních cyklů ve středu základové linie 1-1'. Počet výpočtových kroků se pro dílčí modely liší z titulu různých frekvencí. Jestliže u předchozí studie se ukázalo, že se zvětšující se amplitudou beranidla se zvětšují i sledované posuny v základové konstrukci, pak tato závislost neplatí v případě proměnné frekvence. Výpočtové modely ukazují, že se zmenšující se frekvenci beranidla se seizmická odezva konstrukce na dynamické zatížení zvětšuje, což souvisí s rozdílnou periodou vlny  $T$ .



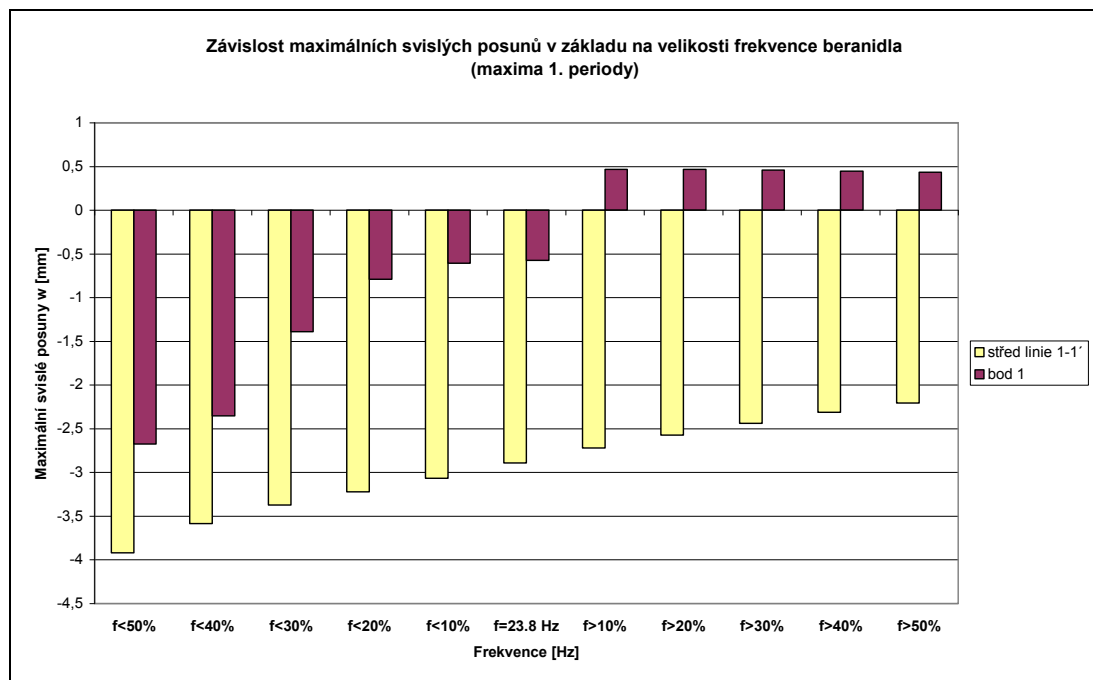
**Graf. č. 3a:** Závislost svislých posunů ve středu základové linie 1-1' na výpočtovém kroku (studie IIC – proměnná frekvence) – část 1 (zvětšování výchozí hodnoty frekvence)



**Graf. č. 3b:** Závislost svislých posunů ve středu základové linie 1-1' na výpočtovém kroku (studie IIC – proměnná frekvence) – část 2 (snížování výchozí hodnoty frekvence)

Sloupcový graf č. 4 znázorňuje velikosti maximálních hodnot svislých posunů dosažených v průběhu prvního vibračního cyklu na hodnotě frekvence beranidla a rekapituluje tak závěry řešení,

kteře jsou uvedeny v odstavci výše. Hodnoty posunů (v absolutní hodnotě) pro bod ve středu základové linie 1-1' i pro bod 1 (roh základu) se zvětšují se snižující se hodnotou frekvence beranidla.



**Graf. č. 4:** Závislost maximálních svislých posunů v základu dosažených v průběhu 1. vibračního cyklu na frekvenci beranidla (studie IIC – proměnná frekvence)

#### Vyhodnocení vlivu dynamických parametrů na seizmickou odezvu stavební konstrukce

Otázkou zůstává, zda větší měrou ovlivní výslednou seizmickou odezvu základové konstrukce měnící se frekvence či měnící se amplituda vibračního beranidla. Pro vyřešení této otázky se s pomocí metody nejmenších čtverců vyhodnotily výsledky řešení studií IC a IIC a stanovila se tak citlivost odezvy dvou výše zmíněných dynamických parametrů.

Pro posouzení citlivosti modelu na dynamické parametry byla uvažována plocha odezvy (response surface) velikosti svislých posunů  $w$  v konstrukci ve tvaru:

$$w(f, \sigma) = A + B \cdot \sigma + C \cdot f, \quad [3a]$$

kde  $w$  svislé posuny [mm],  
 $\sigma$  amplituda dynamického zatížení [MPa],  
 $f$  frekvence [Hz],  
 $A, B, C$  koeficienty rovnice.

K určení této plochy odezvy (tedy ke stanovení koeficientů rovnice  $A, B, C$ ) byly využity výsledky uvedené studie IC a IIC (celkem 22 výsledků parametrických výpočtů pro variantní amplitudu a frekvenci). Na základě těchto variantních výpočtů dostáváme pro určení koeficientů  $A, B, C$  přeuročenou soustavu rovnic:

$$w_i' = w \langle \sigma_i, f_i \rangle = A + B \cdot \sigma_i + C \cdot f_i, \text{ pro } i = 1 \dots n, \quad [3b]$$

kde  $w_i'$  svislé posuny stanovené numerickým výpočtem [mm],  
 $n = 22$  počet dílčích modelů studie IC a IIC.

Pro přibližné řešení takto přeurčené soustavy lineárních rovnic, která je charakteristická tím, že má více rovnic než neznámých, byla použita metoda nejmenších čtverců (MNC). MNC je aproximační metodou spočívající v nalezení takových parametrů funkce, pro které je součet čtverců odchylek vypočtených hodnot od hodnot naměřených minimální. V našem případě by matematický zápis slovní definice MNC měl tvar:

$$\min \|w_i' - w \langle \sigma_i, f_i \rangle\|^2 = \min_{A,B,C} \sum_{i=1}^{22} \langle w_i' - A - B \cdot \sigma_i - C \cdot f_i \rangle^2. \quad [4]$$

Řešením rovnice [4] získáme soustavu tří rovnic o třech neznámých A, B, C:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \langle w_i' - A - B \cdot \sigma_i - C \cdot f_i \rangle &= 0 \\ \sum_{i=1}^n \langle w_i' - A - B \cdot \sigma_i - C \cdot f_i \rangle \sigma_i &= 0 \\ \sum_{i=1}^n \langle w_i' - A - B \cdot \sigma_i - C \cdot f_i \rangle f_i &= 0 \end{aligned} \quad [5]$$

Po úpravě:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n w_i' - n \cdot A - B \sum_{i=1}^n \sigma_i - C \sum_{i=1}^n f_i &= 0 \\ \sum_{i=1}^n w_i' \sigma_i - A \sum_{i=1}^n \sigma_i - B \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 - C \sum_{i=1}^n \sigma_i f_i &= 0 \\ \sum_{i=1}^n w_i' f_i - A \sum_{i=1}^n f_i - B \sum_{i=1}^n \sigma_i f_i - C \sum_{i=1}^n f_i^2 &= 0 \end{aligned} \quad [6]$$

Po dosazení hodnot uvedených v tab. č. 3 do soustavy rovnic [6], dostáváme řešení:

$$\begin{aligned} A &= -1,540 \\ B &= -0,145 \\ C &= 0,063 \end{aligned}$$

Dosazením do rovnice [3a] získáme:

$$w \langle \sigma, f \rangle = A + B \cdot \sigma + C \cdot f = -1,54 - 0,154 \cdot \sigma + 0,063 \cdot f. \quad [7]$$

Dosadíme-li do konečného vztahu [7] hodnoty frekvencí a amplitud, které vstupovaly do výpočtových modelů, a porovnáme-li tyto vypočtené hodnoty ( $w_i$ ) s hodnotami namodelovanými ( $w_i'$ ), dostaneme hodnotu odchylky (resp. chyby, označená  $\Delta w_i$ ), daná přibližným řešením přeурčené sou-



stavy rovnic. Jak je patrné v tabulce č. 3, kde jsou v posledním sloupci uvedeny rozdíly ve velikostech maximálních posunů vypočtených ( $w_i$ ) a namodelovaných ( $w'_i$ ), tyto rozdíly nepřesáhly hodnotu 0,052mm a lze tedy konstatovat dobrou aproximaci svislých posunů získaných numerickým modelovým řešením uvažovanou polynomicickou plochou odezvy.

**Tab. č. 3:** Tabulka hodnot maximálních svislých posunů namodelovaných ve středu základové linie 1-1', vypočtených pomocí vztahu [7] a jejich rozdíly

i	$\sigma_i$ amplituda [MPa]	$f_i$ frekvence [Hz]	$w'_i$ – hodnota maximálních posunů dosažených v průběhu dynam.analýzy [mm]	$w_i = A + B.\sigma_i + C.f_i$ [mm]	$\Delta w$ - rozdíl mezi namodelovanou ( $w'_i$ ) a vypočtenou ( $w_i$ ) hodnotou posunů [mm]
1	10	23,8	-1,445	-1,488	<b>0,043</b>
2	12	23,8	-1,735	-1,778	<b>0,044</b>
3	14	23,8	-2,024	-2,068	<b>0,045</b>
4	16	23,8	-2,313	-2,358	<b>0,045</b>
5	18	23,8	-2,602	-2,648	<b>0,046</b>
6	20	23,8	-2,891	-2,938	<b>0,047</b>
7	22	23,8	-3,180	-3,228	<b>0,048</b>
8	24	23,8	-3,469	-3,518	<b>0,049</b>
9	26	23,8	-3,758	-3,808	<b>0,050</b>
10	28	23,8	-4,047	-4,098	<b>0,051</b>
11	30	23,8	-4,336	-4,388	<b>0,052</b>
12	20	11,9	-3,922	-3,689	<b>-0,233</b>
13	20	14,28	-3,585	-3,539	<b>-0,046</b>
14	20	16,66	-3,372	-3,389	<b>0,016</b>
15	20	19,04	-3,221	-3,239	<b>0,018</b>
16	20	21,42	-3,067	-3,088	<b>0,021</b>
17	20	23,8	-2,891	-2,938	<b>0,047</b>
18	20	26,18	-2,721	-2,788	<b>0,067</b>
19	20	28,56	-2,572	-2,638	<b>0,065</b>
20	20	30,94	-2,439	-2,488	<b>0,049</b>
21	20	33,32	-2,418	-2,338	<b>-0,080</b>
22	20	35,7	-2,442	-2,187	<b>-0,255</b>

Lze tedy říci, že větší měrou se na velikost seizmické odezvy základové konstrukce podepíše změna amplitudy beranidla, méně pak změna frekvence beranidla, jak vyplývá ze vztahu [7] dle velikostí koeficientů  $B$ ,  $C$ . Tato tvrzení platí pro dané rozmezí variantních hodnot frekvence a amplitudy beranidla a dané geologické podmínky.

## 4 SHRnutí VÝSLEDKŮ ŘEŠENÍ

Článek poukazuje na možnost využití výpočtového programu CESAR-LCPC-CLEO 3D pro stanovení míry vlivu změny dynamických parametrů (amplituda beranidla a frekvence beranidla) na seizmickou odezvu základové konstrukce. V modelové studii se sledoval vliv změny velikosti jednoho dynamického parametru (při konstantní hodnotě druhého parametru) na odezvu základové konstrukce v blízkosti beraněné piloty. Ukázalo se, že se zvětšující se hodnotou amplitudy rostly i sledované svislé posuny v základu, přičemž změna amplitudy neovlivnila časovou lokalizaci maxim / minim svislých posunů v základové konstrukci. U modelů s měnící se frekvencí vibračního beranidla se naopak se zmenšující se hodnotou frekvence velikost svislých posunů v základu zvětšovala a stejně tak se i měnila časová lokalizace maxim / minim svislých posunů v základové konstrukci. Otázkou však zůstalo, zda více ovlivní výslednou seizmickou odezvu změna frekvence či amplitudy beranidla. Pro vyřešení této otázky se s pomocí metody nejmenších čtverců vyhodnotily výsledky řešení modelových studií a stanovil se charakter projevu dvou výše zmíněných dynamických parametrů. Výsledky analýzy ukázaly, že větší mírou se na velikost seizmické odezvy podepíše změna amplitudy beranidla, méně pak změna frekvence beranidla.

*Tento výsledek byl získán za finančního přispění MŠMT ČR, projekt 1M6840770001, v rámci činnosti výzkumného centra CIDEAS.*

## LITERATURA

- [1] ČSN 73 0040 Zatížení stavebních objektů technickou seizmicitou a jejich odezva
- [2] BULLEN, K. E.; BOLT, B. A.: An Introduction to the Theory of Seismology. Cambridge University Press, fourth edition, 1993.
- [3] DVOŘÁK, A.: Základy inženýrské seismiky. Přírodovědecká fakulta University Karlovy, Praha 1969
- [4] HULLA, J.; TURČEK, P.: Zakladanie staveb. Jaga group, Bratislava 2004. 359 s.
- [5] Manuál program CESAR-LCPC-CLEO 3D
- [6] REKTORYS, K.: Přehled užití matematiky I. Prométheus, Praha 2000, 720s., ISBN 80-7196-180-9.
- [7] REKTORYS, K.: Přehled užití matematiky II. Prométheus, Praha 2000, 874s., ISBN 80-7196-181-7.
- [8] Technical Instructions - Pile Driving Equipment; U.S.Army Corps of Engineers, Washington 1998.

**Recenzoval:** Ing. Jaromír Knejzlík, CSc., Ústav geoniky AVČR, v.v.i., Ostrava